

## ABV (NBC) ANYAGOK ÉPÜLETEKBEN TÖRTÉNŐ TERJEDÉSÉNEK NUMERIKUS SZIMULÁCIÓJA ÉS MODELLKÍSÉRLETE

Csécs Ákos<sup>(1)</sup>, Dr. Csurgai József<sup>(2)</sup>, Suda Jenő Miklós<sup>(3)</sup>, Dr. Kristóf Gergely<sup>(4)</sup>,

Dr. Pintér István<sup>(5)</sup>, Zelenák János<sup>(6)</sup>

<sup>(1)</sup> munkatárs, <sup>(3)</sup> tanársegéd, <sup>(4)</sup> docens, BME Áramlástan Tanszék,  
<sup>(2)</sup> mk. alezredes, <sup>(5)</sup> mk. ezredes, Vegyivédelmi Információs Központ,  
<sup>(4)</sup> mk. alezredes, HM Technológiai Hivatal

**Összefoglaló.** A nemzetközi terrorizmus fenyegetése miatt realitássá vált az ABV anyagok alkalmazásának veszélye. A csapatok és a lakosság védelme szempontjából szükséges a számítógépes modellek kidolgozása ABV (NBC) anyagok épületek belső tereiben történő terjedésének leírására.

A kutatás célja az ABV (NBC) események következtében védett objektumokban kibocsátott szennyezőanyagok transzmissziós és immissziós előrejelzési rendszerének kidolgozása a klimatizálás, szellőzés, termikus hatások figyelembe vételével, amire a terjedés numerikus, számítógépes szimulációja ad lehetőséget.

A cikk bemutatja egy csarnok belsejében lejátszódó terjedési folyamatok numerikus szimulációját, valamint egy épület belső terében kiszabaduló gáz terjedésének numerikus szimulációval történő leírását és a számítási eredmények modellkísérlettel történő ellenőrzését. A vizsgálatok alapján javaslat tehető az áramlások numerikus szimulálása és a szélcsatorna mérés technika gyakorlati alkalmazására.

### 1. Bevezetés

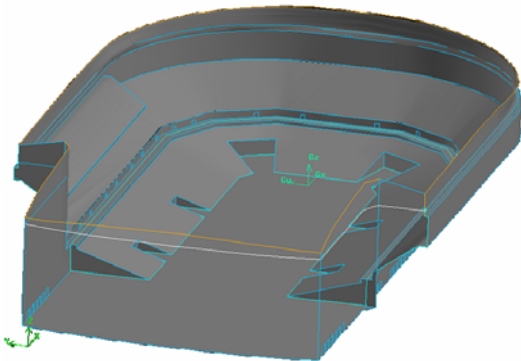
Az ABV (NBC) anyagok különböző épületekben való alkalmazása esetén a szennyezőanyag-terjedés paramétereinek (kibocsátási hely, hatásterület, szennyezőanyag-koncentráció) ismerete elengedhetetlen a csapatok és a lakosság megfelelő védelme szempontjából. A vizsgált csarnok és épület belső terének modelljére elvégzett szennyezőanyag-terjedés számítógépes szimuláció és modellmérés összehasonlító elemzésének célja a kibocsátott ABV (NBC) anyagok transzmissziós és immissziós paramétereinek meghatározása.

### 2. Egy csarnok belső terében bekövetkező terjedés numerikus szimulációja

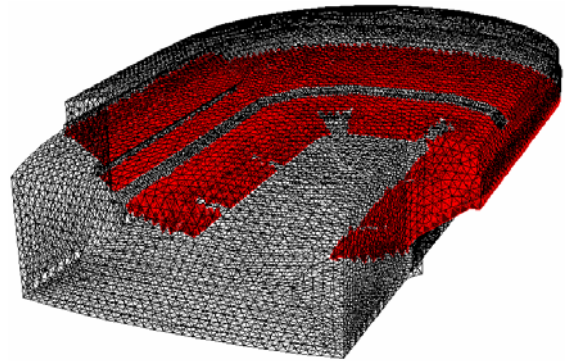
#### 2.1. A numerikus modell

A csarnok belső terének háromdimenziós (3D) geometriai modellje látható az **1. ábrán**. A belső tér numerikus hálóját pedig a **2. ábra** mutatja: tetraéder hálóelemek esetén a cellák száma közel 340 ezer. Ilyen nagyméretű térben a terjedés modellezésénél a numerikus szimuláció számára szükséges részletesség mellett elegendő a csarnokban csak az 1m-nél nagyobb részletek figyelembe vétele. Így a modell tartalmazza a 6m magasságban található 1m×1m méretű és az ideiglenes lelátó alatt 0,2m magasságban található 2m×2m területű elszívó nyílások, valamint a légbevezető anemosztátok modelljét, viszont nem szükséges a csarnok lelátóján levő ülések, kisebb rudak, csövek stb. modellezése, amely egyébként a cellaszámot is feleslegesen nagymértékben növelné [1, 2 és 3].

A vizsgált tartomány két térrészből áll: a nagy légtérből és ideiglenes lelátó alatti légtérből. A két térrészt elválasztó ideiglenes lelátó (egymásba tolható, így a légáramlást lehetővé tévő ülésorok) felületének veszteségtényezőjét a számítás figyelembe veszi. A közönség (2. ábrán piros cellák) által kibocsátott hőt (termikus hatást) a lelátók és a küzdőtér felületének közelében elhelyezett térfogati hőforrásokkal modelleztük.



1. ábra A geometriai modell

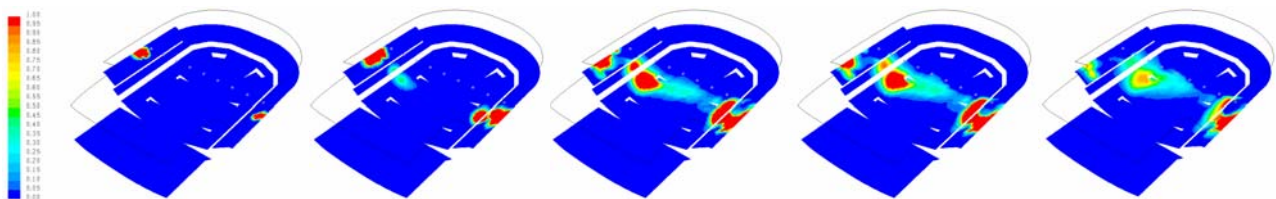


2. ábra A háromdimenziós modell numerikus hálójá

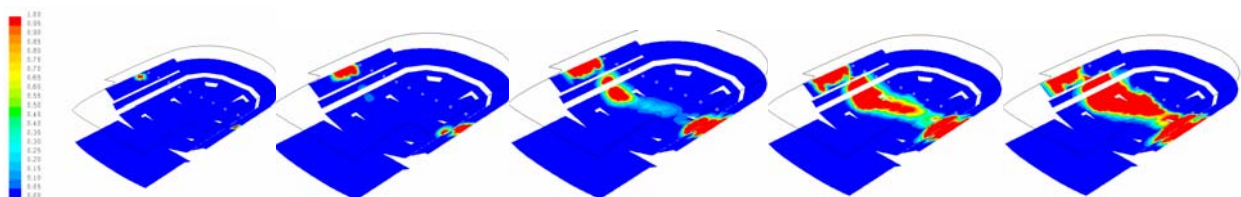
A számítási eljárás alapja az, hogy miután a vizsgált teret, felosztjuk nagyszámú térfogatrészre (ún. cellára) és a számítások elvégzéséhez a jelenleg piacvezető FLUENT<sup>®</sup> szoftvert használjuk, amely kód a véges térfogatok elvén működik. A 3D geometriai modell és a háló elkészítése után a számítási paraméterek (kezdeti- és peremfeltételek) megadása során nyári üzemállapotot, és egy anemosztátsoron impulzusszerűen ( $\Delta t=1s$ ) ill. hosszabb idő ( $\Delta t=50s$ ) alatt bejuttatott  $13m^3$  gáz terjedését szimuláltuk. A többi anemosztáton levegő áramlott be a csarnokba: nyári üzemállapotban lefelé irányított anemosztátokon  $625.000m^3/h$  térfogatáramú levegő hőmérséklete  $16^\circ C$ .

## 2.2. Szimulációs eredmények

A 3. ábrán látható a gáz terjedésének időbeni lefutását jellemző koncentráció-megoszlás a bejuttatás után 20 másodpercenként, a nézők fejének magasságában. Látható, hogy a koncentráció a nézőtér felső – az anemosztátsorhoz legközelebb eső – sorainak közelében nagy, egyes részein gyorsan nő, majd az elszívás következtében ugyancsak gyorsan csökken, 100s után a bejuttatott anyag 96%-a már távozott. A 4. ábrán pedig a koncentráció időbeni változása látható, de az 50s időtartamú bebocsátás esetére: a gáz a levegővel együtt 20.000 ppm koncentrációval jut be a csarnokba.

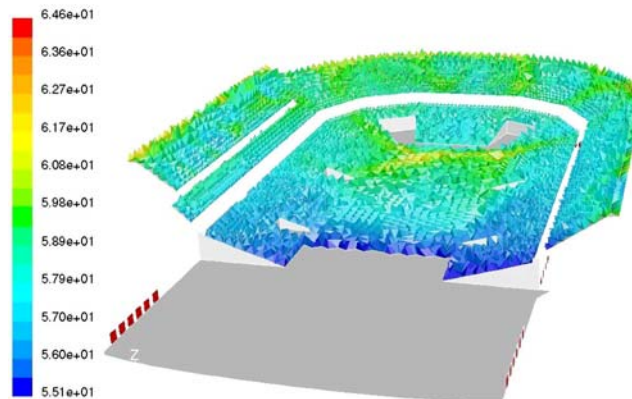


3. ábra Koncentráció időbeni változása a gáz impulzusszerű ( $\Delta t=1s$ ) bevezetése esetén



4. ábra Koncentráció időbeni változása a gáz ( $\Delta t=50s$ ) alatti lassú bevezetése esetén

A FLUENT® szoftver alkalmazásával természetesen lehetőség van például a nézőtéren kibocsátott egyéb anyagtranszport szimulálására is: az **5. ábra** pl. a nézők által kibocsátott vízgőz ( $0.0187 \text{ g/s/fő}$ ) miatt kialakuló relatív nedvességtartalom megoszlását mutatja a nézőtéri helyeken.

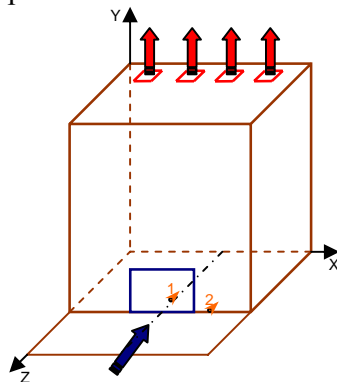


**5. ábra** A levegő relatív nedvességtartalma a nézőtéren

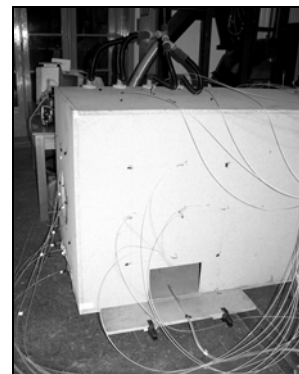
### 3. Épület belső terében kialakuló terjedés vizsgálata modell-kísérlettel

#### 3.1. Az épületmodell és a mérési módszer

Az épület belső terét egy egyszerű geometriájú,  $1 \text{ m}^3$  térfogatú, kocka alakú térrészként modelleztük. Ez egy tetszőleges épület belső terének (pl. előcsarnokának) az egyszerűsített modellje (**6. ábra**). Az épületmodell bejáratát egy  $200 \times 300 \text{ mm}$  méretű nyílás modellezi, a tetején kialakított 4 elszívónyíláson keresztül egy szokásos légcserétényező értékére kiszámolt adott térfogatáramú mesterséges elszívást alkalmaztunk. A nyílásokhoz csatlakoztatott elszívó rendszerben a változtatható térfogatáramot a modell és az elszívó ventilátor között elhelyezett mérőperem segítségével mértük és állítottuk be. Az épületmodell és a csatlakozó gáz mintavevő csövek fotója a **7. ábrán** látható.



**6. ábra** Az épületmodell vázlata



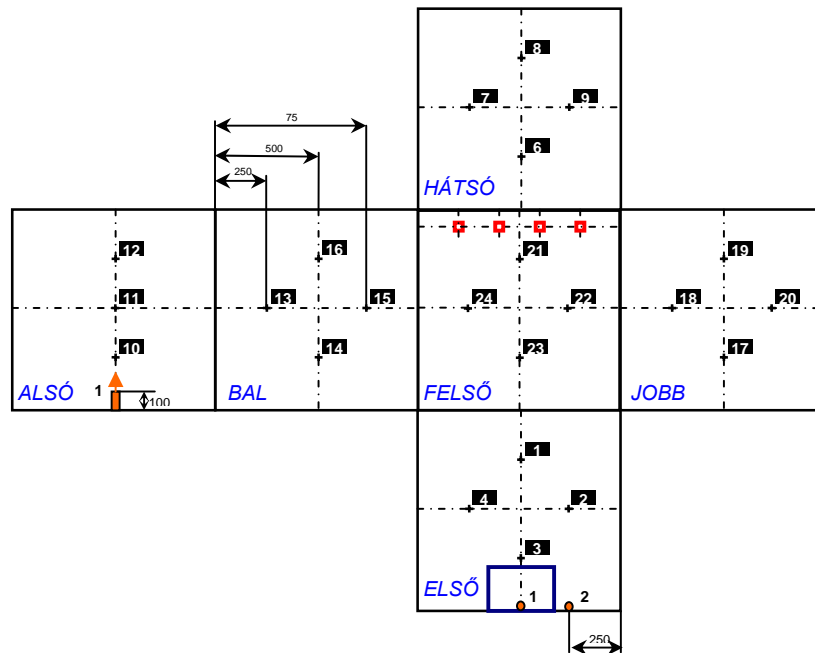
**7. ábra** Mérőberendezés

Az épületmodell esetében két terjedési állapotot szimuláltunk:

- 1) az állandósult áramlási állapot kialakulása után metán nyomgázt vezettünk be izokinetikusan a kapu tengelyében a talajon lévő csövön keresztül a beáramló levegősugárba (**6. és 8. ábra** 1. jelű pont),
- 2) valamint a kapu mellett jobbra a falon, a beáramló levegősugár mellett kialakuló leválási zónába (**6. és 8. ábra** 2. jelű pont).

A belső térben, az oldalfalon jellemző nyomgáz-levegő elegy gázkoncentrációját mintavételezéssel mértük a modell falán a **8. ábrán** látható pontokban, valamint a középsíkban a talaj feletti 10, 11, 12 pontokban. A kialakult levegőáramlás utáni nyomgáz-bevezetés megkezdése után meghatározott időp

eltelte után a 2., 5. és 10. percben egyszerre vettünk mintát fecskendők segítségével. A mintában lévő nyomgáz koncentrációját a kalibrált lángionizációs berendezés méri. Az épületmodell háttér-koncentrációját egy külső 5. sorszámú pontban mértük.



8. ábra A gáz bejuttatás (1, 2) és a mintavételezési pontok (1-24) elrendezése az épületmodell falain

### 3.2. A mérési eredmények

Az adott pontban mért a metán koncentráció  $c_{\text{mért}}$  értékét [ppm]-ben kapjuk meg. Ezt a  $c^*$  [ $m^3/m^3$ ] dimenziótlan koncentráció értékekre számíthatjuk át az alábbi összefüggés szerint:

$$c^* = c_{\text{mért}} \cdot \frac{q_{V,e}}{q_{V,CH_4}},$$

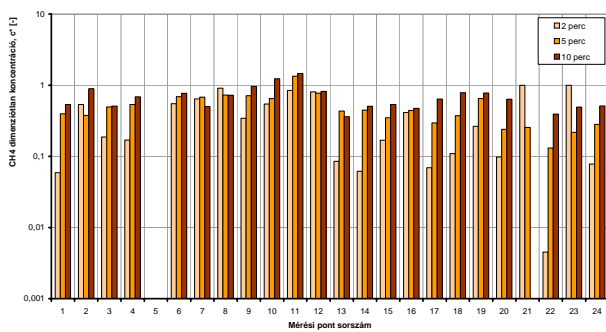
ahol  $c_{\text{mért}}$  [ppm] a mért érték,  $q_{V,e}$  [ $m^3/s$ ] az épületmodellel átáramló, elszívott levegő térfogatárama, valamint  $q_{V,CH_4}$  [ $m^3/s$ ] az összes bejuttatott metán térfogatárama. Jelen paraméterek ( $q_{V,e}=15m^3/h$ ,  $q_{V,CH_4}=10l/h$ ) esetére a tiszta metán gáz  $c^*$  értéke  $c^*=1500$ .

Az 1. jelű bevezetésre számolt dimenziótlan koncentráció értékeit a 9. ábra, a 2. jelű pontban bevezetett nyomgáz esetére pedig a 10. ábra mutatja logaritmikus léptékben.

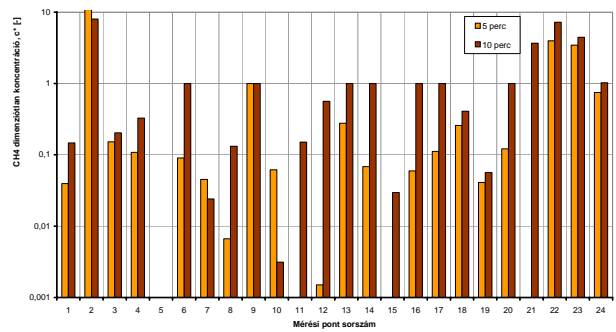
A mérési eredmények alapján a megállapítható, hogy ha az 1. jelű pontban vezetjük be a nyomgázt, akkor az gyorsan eljut a mintavételi pontokig, a koncentráció a mérési pontok nagy részében viszonylag gyorsan, már 5 perc alatt már megközelíti a 10 perc alatt kialakuló értéket, és a nyomgáz koncentrációja általában nem nő meg jelentősen, miután az áramló levegővel együtt az elszívó rendszeren keresztül távozik is a modellből.

Ettől jelentősen eltérő a helyzet, ha a 2. jelű pontban bocsátjuk be a nyomgázt az ajtó melletti leválási zónába. Ebbe a pangó zónába való gázbevezetés 2 perc elteltével gyakorlatilag még nem mérhető (a háttér-koncentráció nagyságrendjébe eső) koncentrációt eredményez az épületmodell egyéb részein, ezért nem tartalmazza a 2. perchez tartozó mérési eredményeket a 10. ábra.

Az 5., illetve 10. perc elteltével vett mintákból számolt  $c^*$  értékekből világosan látszik, hogy a pangó zónába való bevezetés esetén dominál az időfüggés, illetve jelentős eltérések adódnak a fali  $c^*$  értékekben, hiszen a terjedési jelenségben dominál a levegő és gáz közötti sűrűségkülönbségből adódó felhajtóerő-hatás az 1. jelű bevezetés esetére jellemző konvektív hatással szemben.



**9. ábra** Dimenziótlan koncentráció  $c^*$ , az ajtón keresztül beáramló levegőbe (1 jelű pontban) bevezetett nyomgáz esetén. /mérési eredmény/



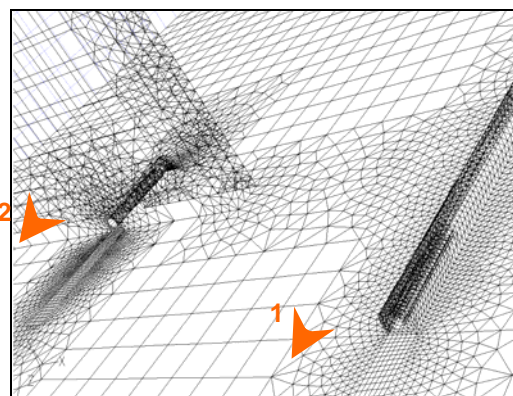
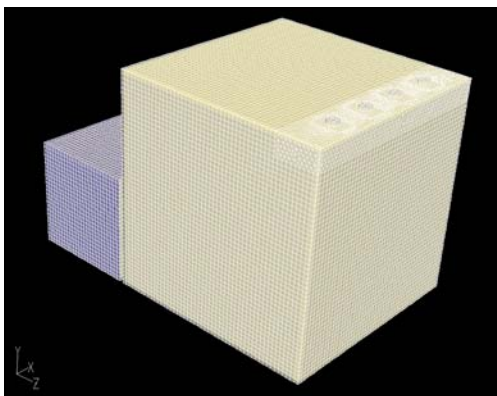
**10. ábra** Dimenziótlan koncentráció  $c^*$ , az ajtó mellett (2 jelű pontban) a leválási zónában bevezetett nyomgáz esetén. /mérési eredmény/

A nyomgáz 10 perc alatt gyakorlatilag nem jutott el a mintavételi pontok jelentős részéhez, ugyanakkor a leválási (pangó) zónában koncentrációja folyamatosan nő, és igen nagy értéket is elér (lásd. **10. ábra**) közvetlenül a bebocsátás feletti mérési pontokban, hiszen a levegőnél könnyebb gáz azonnal függőlegesen felfelé indul meg. Nagy értékeket ennek következtében a homlokfalon a bebocsátás környezetében és az épületmodell tetején mértünk. A sűrűségkülönbség az 1. eset nagyobb levegősebességénél alárendelt szerepet játszik a terjedésben.

#### 4. Épület belső terében kialakuló terjedés vizsgálata numerikus szimulációval és az eredmények összehasonlítása

##### 4.1. A numerikus modell

Az épületmodell belső terének numerikus modellje (**11. ábra**) a mérőberendezés geometriájának 1:1 másolata. A csarnok számításához hasonlóan ebben az esetben is a FLUENT® áramlástani szimulációs szoftvert használtuk. A metán nyomgáz bevezetések, mint tiszta metán gázbebocsátás peremfeltételek jelennek meg a numerikus szimulációban. A bevezetések környezetében használt részletes numerikus hálózati celláit a **11. ábra** jobboldali képe mutatja.



**11. ábra** Az épületmodell 3D számítási geometriája és a nyomgáz bevezetések környékének numerikus hálózata

A numerikus számítás esetében a 3D geometria behálózása, a peremfeltételek és a numerikus szimuláció beállítási paraméterei az alábbiak voltak:

- a felépített épületmodell mérethű numerikus leképezése M 1:1 méretarányal;
- a levegő ajtón keresztül történő valósághű szabad beáramlásához egy „numerikus előtér” kialakítására volt szükség;
- a metán bebocsátásához használt csövet is modelleztük, izokinetikus beáramlásból számolt sebesség a peremfeltétel;
- az elszívásoknál ehhez hasonló, de negatív előjelű sebesség a peremfeltétel;

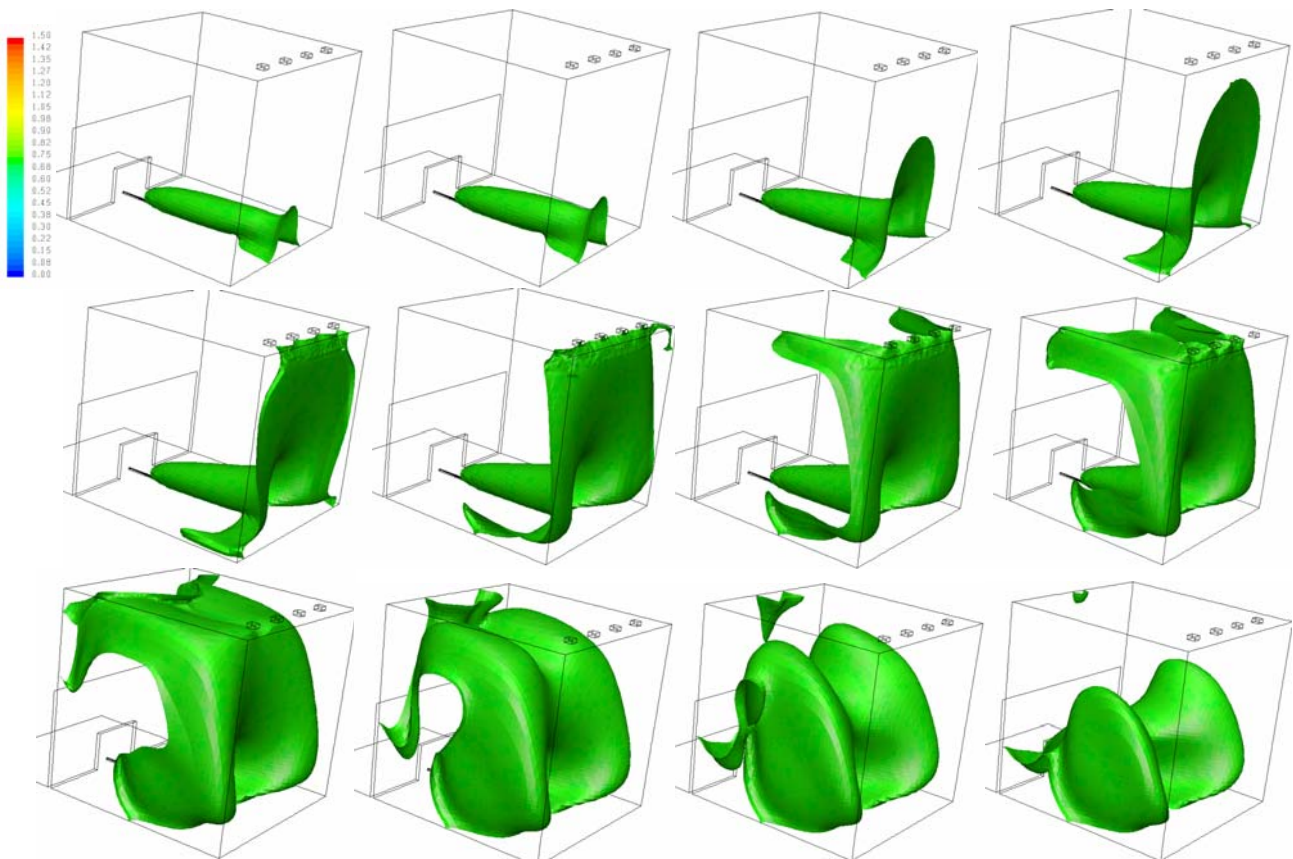


- a végső cellaszám 246 ezer, előzetes áramkép cellaszám-függetlenségi vizsgálatok után;
- k- $\epsilon$  turbulencia-modell;
- a terjedés számításnál figyelembe vettük a gravitáció hatását, fontosságát a belső térre jellemző kis áramlási sebességek indokolták és a levegő / metán sűrűségkülönbségből adódó felhajtóerő-hatást a szimuláció is alátámasztotta;
- stationer levegőáramlás áramképének kiszámítása után a metán bejuttatásának indításától időfüggő futtatás, valóságos időléptékkel, percenkénti adatmentéssel, mindkét forrás esetére legalább 10 perces időtartamot vizsgálva;

#### 4.2. A számítási eredmények

A numerikus szimuláció esetében is ugyanazon mérőszámmal (a metán térfogati molarányából számolt  $c^*$  dimenziótlan koncentrációval) jellemeztük az épületmodellben a terjedési viszonyokat, ahogy azt a mérési eredményeknél is tettük. A numerikus szimuláció előnye, hogy míg a mérésből csupán a 24db fali mintavételezési pont adatai, a szimulációból a 3D tér minden pontjára vonatkozó adat a rendelkezésre áll. Így a numerikus szimuláció eredményeit jól szemléltetik az alábbi 3D ábrák.

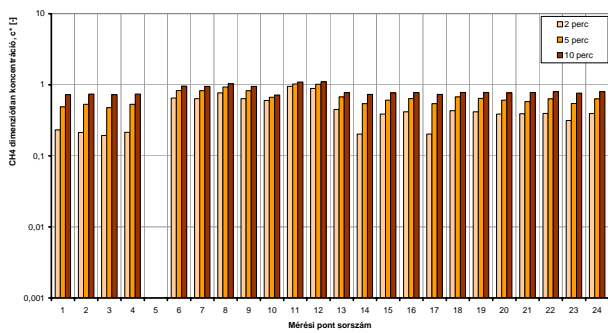
A metán dimenziótlan koncentráció  $c^*=0.75$  értékű kontúrját mutatja az 1 jelű pontban bevezetett nyomgáz esetén a **12. ábra** a forrás indítása utáni első 12 percben percenként.



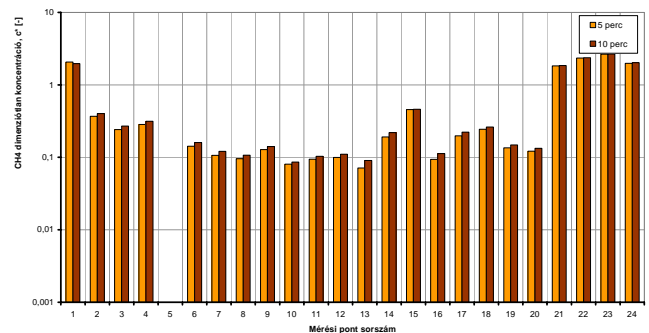
**12. ábra** Dimenziótlan koncentráció  $c^*=0.75$  szintfelület az 1 jelű forrás esetén,  $\Delta t=1$  percenként /számítási eredmény/

A **12. ábrán** látható, ahogy a nyomgáz a bejáratától a kiáramlási irányát követve kissé emelkedve egyenesen a hátsó fal felé indul, majd a tetőelszívás felé feláramolva az 5. perc végére már bejut az elszívó rendszer nyílásaiba. Ezután a nyomgáz az épületmodell teljes térfogatában kezd szétterülni, és az oldalsó belső pangó térrészekben is feldúsul. Az utolsó felvételekről egyértelműen látszik, hogy a 12. perc végére már szinte csak a bejárat két oldalán alul található olyan zóna, ahová nem jut be a gáz.

A **13 és 14 ábrák** a méréseknek megfelelő pontokban ábrázolják a  $c^*$  számított dimenziótlan koncentrációt.

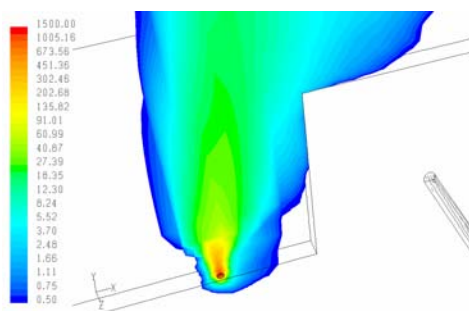


**13. ábra** Dimenziótlan koncentráció  $c^*$ , az ajtón keresztül beáramló levegőbe (1 jelű pontban) bevezetett nyomgáz esetén. /számítási eredmény/

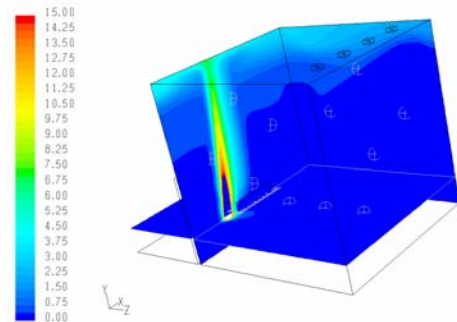


**14. ábra** Dimenziótlan koncentráció  $c^*$ , az ajtó mellett (2 jelű pontban) a leválási zónában bevezetett nyomgáz esetén. /számítási eredmény/

A 2 jelű forrás esetére a  $c^*$  dimenziótlan koncentráció értékeit ábrázoltuk a fali ill. a vízszintes és függőleges síkokban (**15. és 16. ábrák**). A (2) forrás esetére a gyors feláramlás is láthatóvá válik az épületmodell oldalfalainak  $c^*$  adatait tartalmazó **16. ábra** segítségével. Az oldalsó alsó pangó leválási zónában elhelyezett 2 jelű forrás esetén a nyomgáz a kisebb sűrűsége miatt az első fal mellett gyorsan feláramlik, de a tető alatt már csak lassan éri el az elszívási pontokat.



**15. ábra** Dimenziótlan koncentráció  $c^*$  a 2 jelű forrás forrás közelében, a falon /számítási eredmény/



**16. ábra** Dimenziótlan koncentráció  $c^*$  a 2 jelű forrás esetén az épületmodell oldalfalain, /számítási eredmény/

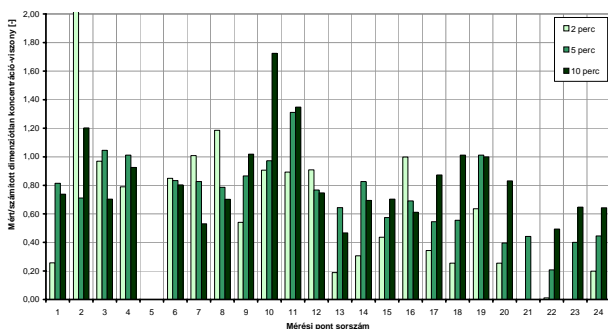
## 5. A számítási és a mérési eredmények összehasonlítása

Az épületbelsőben terjedő gáz mérési és számítási eredményeinek összevetése a mért és számított  $c^*$  értékeknek adott mérési pontokban történő összehasonlításával tehető meg. Ezért a mért és a számított  $c^*$  értékek hányadosát képezzük, és az így definiált  $C^*$  értékeit ábrázoljuk a 24db mérési pontra.

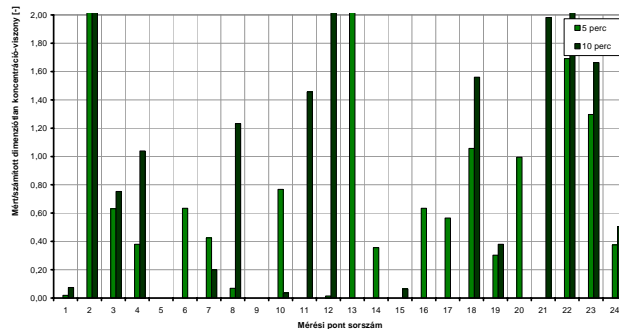
$$C^* = \frac{c^*_{\text{mért}}}{c^*_{\text{számított}}}$$

Ez a hányados a mérési és számítási eredmények közötti eltérést jellemző dimenziótlan koncentráció-viszony, amely egységnyi értéke a mérési és számítási eredmények közötti teljes egyezést jelzi.

A **17. ábrán** látható, hogy az 1. jelű forrás esetében néhány értéktől eltekintve viszonylag jó egyezés adódott az 1-12 számú – az ajtót tartalmazó és az azzal szembeni falon, valamint a talaj fölött levő – mérési pontokban. A  $C^*$  koncentráció-viszonyról elmondható, hogy számos esetben kisebb, mint egységnyi, tehát a mérési eredményeknél nagyobb koncentrációk adódnak a numerikus szimuláció során. Jelentősebb eltéréseket a tetőn tapasztaltunk (21-24 pontok): a mért értékeknél nagyobb értéket eredményeztek a számítások.



**17. ábra** Dimenziótlan koncentráció-viszony  $C^*$  az 1 jelű forrás esetére.



**18. ábra** Dimenziótlan koncentráció-viszony  $C^*$  a 2 jelű forrás esetére.

A 2. jelű forrás esetében a mérési és a számítási eredmények összevetése a **18. ábrán** látható. Az ábrák alapján megállapítható, hogy a leválási térbe történő bebocsátás esetén a mért és számított koncentrációk között igen jelentős eltérések is vannak, amelyek részben abból adódnak, hogy a koncentráció értékek a mérési pontok legnagyobb részében (5-20 pontok) igen kis értékűek, és amelyek méréssel történő meghatározásában már jelentős hiba követhető el. A mérési eredmények eltéréseinek másik magyarázata, hogy a leválási buborékban kialakuló igen komplex áramlási és ennek következtében terjedési viszonyok leírása a legnehezebb áramlástan feladatai közé tartozik, amelynél belátható idő alatt végrehajtható számításokkal sokszor csak kvalitatív információk nyerhetők.

## 6. Összefoglalás

Az ABV (NBC) anyagok terjedésével kapcsolatos vizsgálat legfontosabb célja az volt, hogy a jelenleg legszélesebb körben alkalmazott, korszerű FLUENT® numerikus áramlástan szimulációs kód milyen mértékben alkalmas a légáramlással együttmozgó anyagok terjedésének leírására zárt terekben. A különböző áramlási viszonyokra, két különböző alapesetre – egy csarnokra és egy épületmodell előterére – vonatkozó kísérleti mérések és numerikus szimuláció eredményeinek összehasonlítása alapján összefoglalóan megállapítható, hogy a numerikus szimuláció alkalmas az ABV (NBC) anyagok terjedésének, így pl. az azt jól jellemző gázkoncentráció térbeli és időbeli megoszlásának meghatározott pontossági határok közötti előrejelzésére. Az előrejelzés pontossága függ a valóságban általában időben és térben is jelentősen változó áramlási, terjedési folyamatok bonyolultságától, valamint a kibocsátás, a hozzááramlás modellezésének helyességétől, valamint kód alkalmazásával kapcsolatos tapasztalatok felhasználásától.

## Irodalomjegyzék

- [1] Ferziger, J. H. and Perić, M. 2002. Computational Methods for Fluid Dynamics 3<sup>rd</sup> Edition, Springer
- [2] Wilcox, David C. 2000. Turbulence Modeling for CFD 2<sup>nd</sup> Edition, DCW Industries Inc.
- [3] Pope, Stephen B. 2000. Turbulent Flows, Cambridge University Press